

パルス発振レーザーによる遠隔分光計測法の基礎的研究

著者	清水 浩
号	559
発行年	1976
URL	http://hdl.handle.net/10097/9295

氏 名	しみず ひろし 清 水 浩
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 1 年 4 月 7 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 応用物理学専攻
学 位 論 文 題 目	パルス発振レーザーによる遠隔分光計測法の基礎的 研究
指 導 教 官	東北大学教授 稲場 文男
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 高橋 正 東北大学教授 柴田 幸男 東北大学教授 堀江 忠児 東北大学教授 仁科雄一郎

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 総 論

レーザー光を用いて遠隔的計測を行なうレーザー・レーダーの研究は，レーザーの出現以来，活発に展開されている。レーザー・レーダーの動作法と応用領域は種々存在するが，高出力のパルス発振レーザーを光源とし，高性能の分光技術と最新の電子工学技術とを組合せて大気物理パラメータを測定するレーザー・レーダー方式は，従来，ポイント・サンプリングによる以外に測定法がなかった，これらのパラメータの測定を遠隔的に行なえるという機能を持つために，その研究，開発は大気物理学や環境公害の研究，制御の上で極めて重要であるのみならず，応用物理学的にも興味深い課題を提供するものである。

本論文では，このような観点から，パルス発振レーザー技術と，高性能の分光技術を基にして，

光と物質との相互作用の内、特にミーおよびラマン散乱現象の特性を積極的に利用して、レーザー・レーダの可能性を拡大するために行なった基礎的研究の結果についてとりまとめて述べるものである。そのために、まず、極微弱パルス光信号処理技術の系統的開発と、基礎的データである気体のラマン散乱断面積の測定を行なった。それらに基づいて大気物理パラメータを多元的に測定するレーザー・レーダー方式を初めて開発し、この方式は従来の単一機能のレーザー・レーダーと比較して多くの優れた利点を有することを実験的に明らかにした。さらに、この測定方式の応用として、雲や霧中の平均粒径および水量密度の遠隔的測定法を新たに開発して、その有効性を実験的に確かめた。

第2章 遠隔分光計測のためのレーザー・レーダーの基本的特性

本章ではレーザー・レーダー装置の基本的特性について総括的に述べると共に、レーザー・レーダーの動作方式は測定の目的により異なるために、まず、その分類を行なった。また装置の主要部分は送信用パルス発振レーザー、受信望遠鏡、分光システム、信号検出およびデータ処理システムから成っているが、これら各構成要素の特性について総合的に検討を加え、装置構成の最適条件を求めた。

第3章 レーザー・レーダーによる遠隔分光計測法の解析的検討

Table 1. 大気物理パラメータの分光的レーザー・レーダーによる遠隔的測定法の基本原理

大気物理 パラメータ	利用する散乱粒子 および散乱現象	測 定 の 原 理
湿 度	H ₂ O および N ₂ 分子 のラマン散乱	H ₂ O 分子のラマン散乱光強度が絶対湿度に比例することを利用
減 衰 係 数	エアゾルによる ミー散乱	ミー散乱光強度が、減衰係数 σ およびミー体積後方散乱係数 β_{Mie} に依存することを利用し、両者の間に適当な関係を仮定する（測定精度が良くない）
	N ₂ 分子の ラマン散乱	N ₂ 分子のラマン散乱光強度が主に減衰係数に依存することを利用（測定精度が良好）
視 程	N ₂ 分子の ラマン散乱	減衰係数の平均値と視程の間に実験的に得られた対応のあることを利用
ミー体積後方 散 乱 係 数	エアロゾルによるミー散乱 N ₂ 分子のラマン散乱	ミー体積後方散乱係数が、ミー散乱光強度と光の透過率に依存することを利用
ミー散乱 パラメータ	エアロゾルによるミー散乱 N ₂ 分子のラマン散乱	ミー散乱パラメータが減衰係数とミー体積後方散乱係数の比で与えられることを利用
気 温	N ₂ 分子の 振動一回転ラマン散乱	気温の変化が大気密度の変化に依存することを利用し大気密度の変化を N ₂ 分子のラマン散乱光強度から測定する（相対的温度変化の測定に用いられる）
	大気分子の 純回転ラマン散乱	大気分子の純回転ラマン散乱スペクトルの形状が、気温により変化することを利用
	O ₂ 分子の振動・回転ラ マン散乱のストークスお よびマンチ・ストークス成分	大気分子の振動一回転ラマン線のストークス線とアンチ・ストークス線の強度比が温度変化することを利用

レーザー・レーダーを用いて大気物理パラメータを観測することの最大の利点は遠隔的測定にあるわけで、具体的には三次元的に、大気状態を乱すことなしに、しかも実時間で測定が可能であることなどの特徴が挙げられる。

本章では、このような特色を有するレーザー・レーダーによる湿度、光の減衰係数、視程、ミー体積後方散乱係数、ミー散乱パラメータ、気温の測定に関する原理的検討を中心に、基礎的な研究結果を示すとともに、この目的に使用されるレーザー・レンズのシステム解析についても触れた。

Table 1. にこれらの大気物理パラメータの測定法の基本的原理をまとめて示す。これらの測定は大気中に存在する気体分子によるラマン散乱光と、エアロゾルによるミー散乱光の含む情報に基いて行なわれるもので、気温の測定法を除いてはこれらの測定法はほぼ確立しているものと言える。

第 4 章 極微弱パルス光の高感度、高精度信号処理法

本章では、レーザー・レーダーを用いた大気物理パラメータの計測と、そのための室内における基礎実験において、高感度かつ、高精度の光信号処理を行なうために開発した 4 種類の極微弱パルス信号処理法の基本的原理およびそれらの諸特性について述べる。

Fig 1. に開発した処理方式の基本的なブロック図を示す。(a)は従来から用いられて来たボックスカー積分法、(b)はこの方式と、従来、連続光の検出で用いられている光子計数法を組み合わせる S/N の向上を図ったパルス・ゲート光子計数法、(c)および(d)はそれぞれ、(a)、(b)の方式に光源の強度変動の補償のための機能を付け加えたもので、さらに(e)は(d)の信号処理回路をデジタル化した方式である。

これらの方式について詳しく検討を行った結果、このような極微弱パルス光の信号処理法においては、すべての測定条件にわたる最適の方式は見出されず、信号光の強度、要求される精度、光源の性質などに応じて、最も適した方式を選別して使用する必要があることが明らかにされた。

第 5 章 パルス・ラマン分光法による気体のラマン散乱断面積の測定

種々の物質のラマン散乱を利用するレーザー・レーダーの動作においては、ラマン散乱断面積

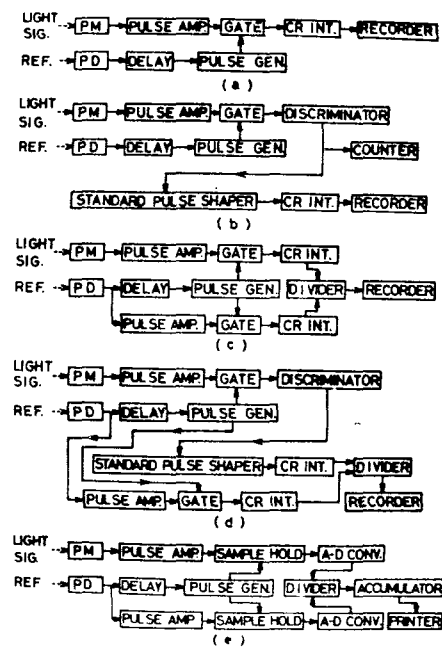


Fig 1. 極微弱パルス光信号処理方式の分類

Molecule	Vib. freq. (cm ⁻¹)	This work (3371 Å)	Murphy et al. (4388 Å)	Looney (3371 Å)	Fenech et al. (5148 Å)	Pennay et al. (5148 Å)
CCl ₄	459	7.7	7.4	—	—	—
NO ₂ (<i>as</i>)	750	7.2	—	—	—	—
(<i>vs</i>)	1330	15	—	—	—	—
SF ₆	775	3.4	3.3	—	—	—
C ₆ H ₆ (<i>as</i>)	991	11.8	12.2	—	—	—
(<i>vs</i>)	3070	10.1 (Q)	10.4	—	—	—
SO ₂	1150	5.7 (Q)	—	—	—	—
		4.9	—	2.4	5.9	—
CO ₂ (<i>as</i>)	1286	0.94 (Q)	0.96 (Q)	—	—	—
		1.1	0.9	—	1.4	—
(<i>vs</i>)	1388	1.2 (Q)	1.2 (Q)	—	—	1.4 (Q)
		1.3	1.4	—	1.3	—
C ₂ H ₄ (<i>as</i>)	1342	3.2 (Q)	3.1 (Q)	—	—	—
(<i>vs</i>)	1623	2.0 (Q)	2.0 (Q)	—	—	—
(<i>vs</i>)	3019	5.3 (Q)	5.8 (Q)	—	—	—
O ₂	1556	1.4 (Q)	1.2 (Q)	—	—	1.1 (Q)
		1.4	1.4	—	1.2	—
NO	1877	0.46 (Q)	—	0.5	0.33	0.44 (Q)
CO	2145	0.90 (Q)	0.92 (Q)	—	0.91	0.97 (Q)
N ₂	2331	1* (Q)	1* (Q)	—	—	1* (Q)
		1**	1**	1**	1**	—
CH ₃ OH(<i>as</i>)	2846	3.9	4.0	—	—	—
(<i>2as</i>)	2955	2.1	2.2	—	—	—
CH ₄ (<i>vs</i>)	2914	7.5 (Q)	7.3 (Q)	—	8.4	8.1 (Q)
(<i>vs</i>)	3020	1.2 (Q)	1.1 (Q)	—	0.47	—
C ₂ H ₅ OH	2943	5.5	—	—	—	2.8 (Q)
H ₂ O	3652	1.6	—	—	—	—
H ₂	4160	3.2 (Q)	3.1	—	2.6	—

* $d\sigma/d\Omega = 2.8 \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ str.}^{-1}$ (Q-branch only)
 ** $d\sigma/d\Omega = 3.4 \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ str.}^{-1}$ (Total)

Table 2. 気体分子のラマン散乱断面
積の測定結果

の値を正確に知ることが常に要求される。本章ではこのような観点から、紫外域の 337.1 nm でパルス発振する N₂ 気体レーザーと前章のパルス信号光処理方式を用いて、N₂ 分子のラマン散乱断面積を基準とする、水蒸気分子や大気汚染に関係のある種々の分子など、16 種類の気体分子のラマン散乱断面積の値を求めた。その結果 Table 2. に示す。この中には、これまでに可視のレーザー光や水銀線などを用いて測定された結果をまとめて示してある。

第 6 章 大気物理パラメータの多元情報測定のためのレーザー・レーダー装置 の設計・試作と動作特性

従来のレーザー・レーダーでは第 3 章で述べたような多くの大気物理パラメータの測定が可能であるが、これらのパラメータを同時に 1 台の装置で測定せることが出来れば、これらのパラメータの個別的な測定では得られない種々の利点が存在する。本章ではこのような観点から試作した多元大気物理パラメータの同時測定のためのレーザー・レーダー装置の設計、試作と主要な動作特性について述べる。

本装置のブロック図を Fig. 2. に、また、装置の性能および特性を Table 3. に示す。同時測定の条件としては、大気状態がほぼ一定と見なせる時間内に必要とするすべてのパラメータの測

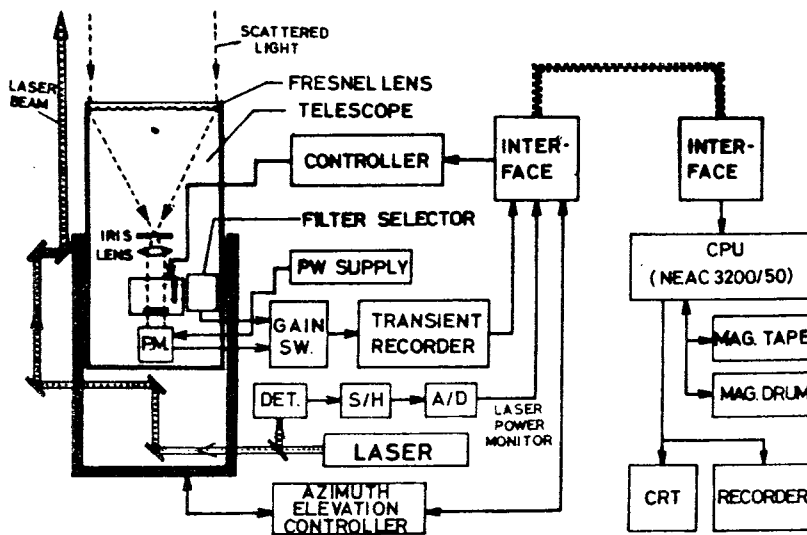


Fig. 2 試作した多元情報測定用レーザー
レーダー装置のブロック図

定を終えることであり、そのために本装置ではシステムを大型化して単位時間当りに得られる情報量を増大させると共に、受信される膨大な量の信号をオンラインで接続したコンピュータで処理することにより、この条件を満たしている。

この装置による大気物理パラメータの測定例をFig. 4.に示す。図には大気中の N_2 および H_2O 分子のラマン散乱光と、エアロゾルによるミー散乱光を同時に測定して得られた、湿度、光の減衰係数、ミー体積後方散乱係数、ミー散乱パラメータが示されている。

このような測定結果から得られる本方式の利点を取りまとめると、得られたデータ相互間の相関から、測定精度が向上すること、ミー散乱パラメータのように全く新しい情報が得られること、1台のシステム当りに得られる情報量が著しく増大することなどである。

LASER — SECOND HARMONIC OF N_2^{3P} : YAG LASER	
WAVELENGTH	532 nm
MAX. REPETITION RATE	50 pps
MAX. ENERGY	20 mJ/pulse
PULSE DURATION	20 ns
BEAM DIVERGENCE	3 mrad
TELESCOPE — FRESNEL LENS REFRACTING TELESCOPE	
DIAMETER	50 cm
FOCAL LENGTH	80 cm
SPOT SIZE	0.5 mm
TRANSIENT RECORDER — MODEL DL905 (DATA LAB)	
MIN. SAMPLING TIME	200 ns
RANGE RESOLUTION	30 m
BIT NUMBER	8 bit/word
WORDS NUMBER	1024 words
INTERFACE	
CHANNEL NUMBER	14 channel parallel
TRANSFER TIME	30 μ s/word
CABLE LENGTH	200 m
COMPUTER — MODEL NEAC 3200/50 (NEC)	
CORE MEMORY	24 kwords
CYCLE TIME	0.96 μ s
CPU DATA PROCESSING TIME	20 ms/1024 words
TOTAL PROCESSING TIME	50 ms/laser shot

Table 3. 試作した多元情報測定
用レーザー・レーダー
装置の性能および特性

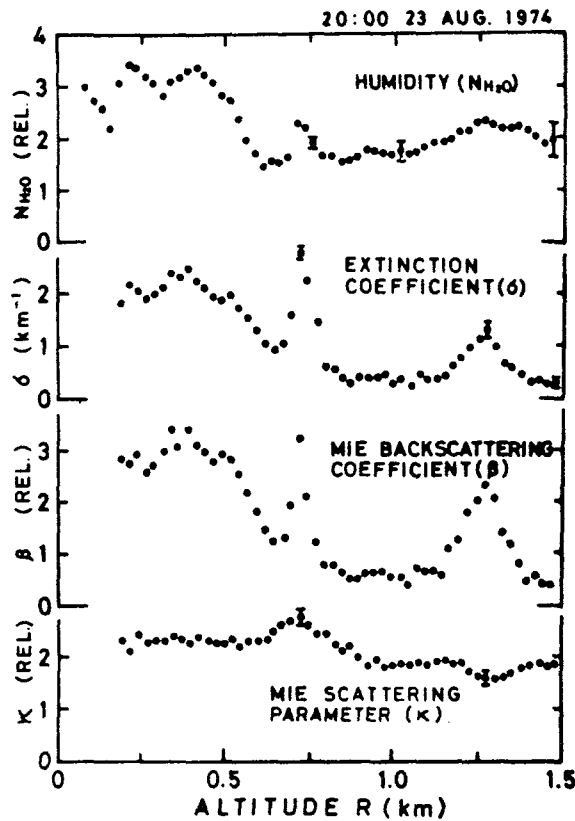


Fig. 3 レーザー・レーダーによる多元大気物理パラメータの同時的測定結果 (1974年8月23日20時)

第7章 多元大気情報測定用レーザー・レーダーによる霧および雲の水量の遠隔測定

これまで、霧や雲中の水滴の粒径や水量密度をレーザー・レーダーを用いて遠隔的に測定する方法は全くなかったが、本章ではその測定法について初めて具体的考察を行って、有効な方式を開発した。そのため、まず、ミー散乱パラメータの性質を理論的に検討し、可視域の入射光に対して、平均粒径が $0.1\ \mu\text{m}$ から数 $10\ \mu\text{m}$ 程度で、十分に広い粒径分布を持つ水滴粒子のミー散乱パラメータの大きさは平均粒径とともに増大することを明らかにした。また、この結果を利用してミー散乱パラメータと減衰係数の測定から、霧や雲の水量密度を遠隔的に測定出来ることを示した。

次に、これらの理論的考察の結果を実験的に検討するために、超音波法により人工霧を発生させ、霧の粒径分布と粒径を変化させた時のミー散乱パラメータの値を測定した。その結果はFig. 4に示す通りで、平均粒径が $0.8\ \mu\text{m}$ から $13\ \mu\text{m}$ までの水滴粒子については、粒径分布に関わりなく、ミー散乱パラメータの値は平均粒径とともにほぼ直線的に増加することが確認された。ま

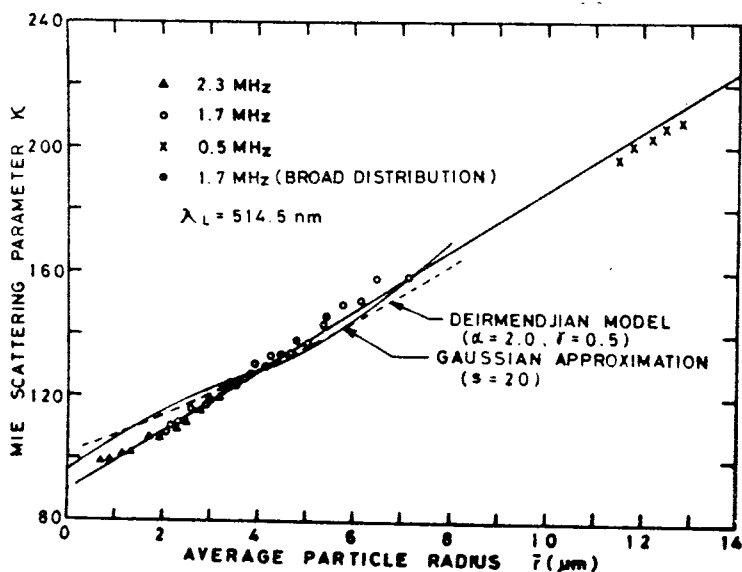


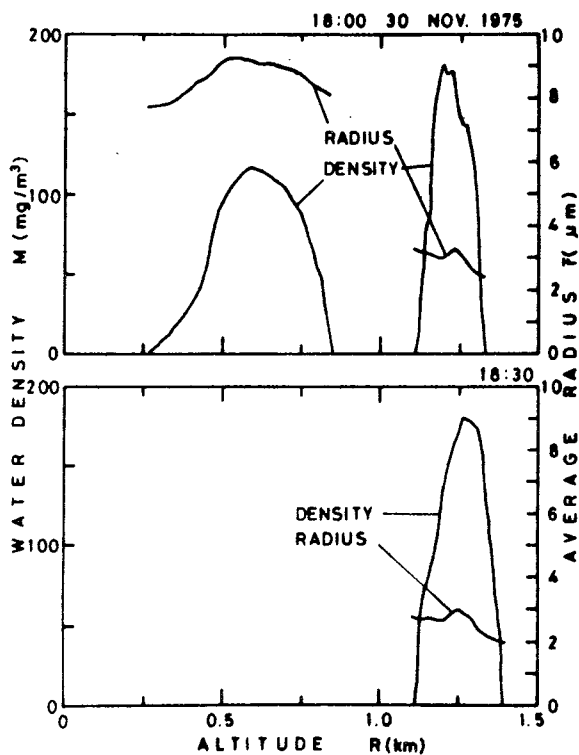
Fig. 4 人工霧のArレーザーを用いたミー散乱
パラメータの測定結果

た、本章で開発したレーザー・レー
ダー方式を用いて人工霧の水量測定
を行ない、室内実験的に求められる
水量とを比較して、この方式が水量
密度の遠隔測定に有効であることを
実証した。

Fig. 5 は、さらに実際の雪雲に
ついて、その平均粒径と水量密度を
遠隔的に測定した例を示すもので、
この測定結果は当時の気象条件と良
く一致することが認められた。

第8章は結論である。

Fig. 5 レーザー・レーダー
による雪の間(a)と降雪の後(b)
における雲中の水滴の平均粒
子半径および水量密度の測定
結果



審 査 結 果 の 要 旨

レーザー光を大気中に発射して遠隔計測を行うレーザー・レーダは、レーザーの最もすぐれた工学的応用の一つとして、近年急速に実用化を目指した研究開発が進められている。この間、高出力のパルス発振レーザーをはじめ、各種の光検出技術や信号処理法などが開発され、レーザー・レーダーの性能向上に大きな役割を果たして来たが、これらの技術の総合的な検討にもとづいて、レーザーによる遠隔計測法の新しい機能と応用分野を開拓することが重要な課題として残されていた。

本研究はこのような課題に新たに取り組んだもので、著者はレーザー光によるラマン散乱とミレー散乱を組合せた分光計測を遠隔的に実時間で行う方法の基礎的諸問題を工学的観点より解明し、これまで実現されていなかった多元情報測定用のレーザー・レーダー装置および高性能データ処理装置の設計、試作を行うと共に、その新しい応用として多元大気物理パラメータの測定が可能であることを明らかにした。本論文はこれらの研究成果をとりまとめたもので、全文8章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、遠隔分光計測のためのレーザー・レーダーの基本的特性と装置の構成要素の検討を行い、装置構成の最適条件を明確にしている。

第3章では、パルス発振レーザーによる遠隔分光計測法の新しい応用分野の開発を目的として、大気物理パラメータの多元情報測定をとり上げ、その測定原理の物理的検討にもとづいて技術的問題点を追究している。

第4章では、前2章で明らかにした遠隔分光計測のためのレーザー・レーダーにおいて、高精度の信号処理を行うために開発した4種類の極微弱パルス光信号処理法の基本原理、およびそれらの諸特性について実験的および解析的に詳しく記しており、その成果は高く評価される。

第5章は、ラマン散乱方式のレーザー・レーダーの設計と動作に欠くことの出来ない気体分子のラマン散乱断面積の測定法を詳しく検討し、さらに諸種の気体分子についての測定結果をとりまとめたものである。

第6章では、新たに設計、試作を行った大気物理パラメータの多元情報測定のためのレーザー・レーダー・システムについて詳細に述べている。レーザー・レーダーにおいて多元情報を同時に計測し、処理するという方式は本論文において初めて提案され、実現されたもので、そのために高性能のパルス発振レーザーを用いたレーザー・レーダー装置とコンピュータを直結したシステムを構成している。このような新しい遠隔計測装置の開発は、その実験結果と併せて、重要な成果といえる。

第7章は、さらに前章で試作開発した装置を用いて、霧や雲中の水滴の平均粒径と、水量密度の遠隔同時測定を行うための新しい方法の考案と実験的検証について述べたものである。この方

法は水滴によるミー散乱と大気中の窒素および水蒸気分子によるラマン散乱の同時測定によって始めて可能となるものであり、著者は応用上有意義な知見を得ている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、パルス発振レーザーを利用して遠隔分光計測を行う高性能のレーザー・レーダー装置を構成するための基本的諸問題を解明し、新たに多元情報計測および処理装置の設計、試作に成功して、その実用面の実験的検討にまで及んで、いくつかのすぐれた知見を加えたもので、応用物理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。